

This Page Is Inserted by IFW Operations
and is not a part of the Official Record

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images may include (but are not limited to):

- BLACK BORDERS
- TEXT CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- FADED TEXT
- ILLEGIBLE TEXT
- SKEWED/SLANTED IMAGES
- COLORED PHOTOS
- BLACK OR VERY BLACK AND WHITE DARK PHOTOS
- GRAY SCALE DOCUMENTS

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

**As rescanning documents *will not* correct images,
please do not report the images to the
Image Problem Mailbox.**

発明の名称

回折格子素子、回折格子素子製造方法、及び回折格子素子の設計方法

関連する出願の対応

本出願は、その全体内容が、引用されて組み込まれた、2003年2月19日出願の
5 米国仮出願出願番号 60/447710 の優先権を主張する。

発明の背景発明の分野

【0001】 本発明は、透過型の回折格子素子、回折格子素子製造方法、及び
回折格子素子の設計方法に関するものである。

関連する背景技術

【0002】 回折格子素子は、一般に、互いに平行な第1面および第2面を有する透明平板において第1面上に回折格子が形成されたものである（例えば、小館香椎子、「回折光学の発展と新展開」、日本女子大学紀要、理学部、第10号、pp. 7-24, (2002) を参照）。この回折格子素子では、例えば、第1面上に接する媒質から該第1面上に光が一定入射角で入射すると、その光は、第1面上に形成された回折格子により回折され、透明平板の内部を通過して、第2面上に接する媒質へ出射される。透明平板の第2面から出射されるときの光の回折角は、波長によって異なる。

【0003】 このように、この回折格子素子は、入射した光を分波して出射する光分波器として用いられ得る。また、この回折格子素子は、上記の場合とは逆の方向に光を導く場合には、入射した光を合波して出射する光合波器として用いられ得る。さらに、回折格子素子と他の光学素子とを組み合わせることで、例えば、波長に応じて光の群遅延時間を調整する分散調整器を構成することもできる。したがって、回折格子素子は、多波長の信号光を多重化して伝送する波長分割多重（WDM: Wavelength Division Multiplexing）光通信システムにおいて重要な光デバイスの1つとなっている。

【0004】 このような回折格子素子では回折効率が高いことが要求される。

そして、回折効率向上の為の構造上の工夫が幾つか提案されており、95%程度の回折効率が報告されている（例えば、米国特許出願公開第2002/0135876号明細書や、Hendrick J. Gerritsen, et al., "Rectangular surface-relief transmission gratings with a very large first-order diffraction efficiency (~95%) for unpolarized light", Applied Optics, Vol. 37, No. 25, pp. 5823-5829 (1998)、を参照）。

発明の概要

【0005】しかしながら、回折格子素子に入射する入射光の入射角、または、回折格子素子により回折されて出射する回折光の回折角は、0度（回折格子が形成された透明平板の第1面または第2面に垂直）では無く、反射による偏波依存性が発生する。また、回折格子は、一方向のみに周期的に屈折率が変化するという構造であるから、特に格子周期が短い（例えば 2λ 以下）ときに、周期方向と偏波方向との角度とが変わると、回折効率が変化する。このように、一般に、回折格子素子の回折効率は偏波依存性を有しており、TE偏波光およびTM偏波光それぞれの回折効率は互いに異なる。特に、回折角の角分散が大きい（合分波における波長分解能が高い）ときに、周期が短くなるから、偏波依存性は顕著になる。

【0006】TE偏波光およびTM偏波光それぞれの回折効率の差を低減するには、反射による偏波依存性と構造による偏波依存性とをキャンセルするように、回折格子の断面形状（格子の高さや幅など）を適切に設計することにより可能である。しかし、そのように設計した場合であっても、回折効率の向上および回折効率の偏波依存性の低減を広い波長域で実現することはできない。

【0007】本発明は、上記問題点を解消する為になされたものであり、反射による偏波依存性と構造による偏波依存性とを個別にキャンセルすることで、回折効率の向上および回折効率の偏波依存性の低減を広い波長域で実現することができる回折格子素子を提供することを目的とする。また、このような回折格子素

子を製造する方法を提供することを目的とする。

【0008】 第1の発明に係る回折格子素子は、(1) 互いに平行な第1平面および第2平面を仮想したときに、第1平面より外側に第1平面に接して設けられた第1媒質(屈折率 n_1)と、(2) 第1平面と第2平面との間に、第1平面および第2平面に接して、第1平面に平行な所定方向に交互に設けられて回折格子を形成している第2媒質(屈折率 n_2)および第3媒質(屈折率 n_3 、ただし、 $n_3 < n_2$)と、(3) 第2平面より外側に第2平面に接して設けられた第4媒質(屈折率 n_4)と、を備える。そして、第1媒質、第2媒質、第3媒質および第4媒質それぞれの屈折率 $n_1 \sim n_4$ が「 $n_3 < n_1 < n_2$ 、 $n_3 \leq n_4 \leq n_2$ 」または「 $n_3 \leq n_1 \leq n_2$ 、 $n_3 < n_4 < n_2$ 」なる関係式を満たすことを特徴とする。さらに、第2媒質および第3媒質の双方が固体であることを特徴とし、或いは、第1媒質または第4媒質が等方性材料からなることを特徴とする。

【0009】 この第1の発明に係る回折格子素子では、第1媒質と第4媒質との間において、第2媒質と第3媒質とが交互に設けられて回折格子が形成されている。第1媒質から回折格子へ入射した光は、回折格子部において回折され、第4媒質へ出射される。或いは、第4媒質から回折格子へ入射した光は、回折格子部において回折され、第1媒質へ出射される。この回折格子素子は、各媒質の屈折率が上記関係式を満たしていることから、回折効率の向上および回折効率の偏波依存性の低減を広い波長域で実現することができる。

【0010】 第1の発明に係る回折格子素子は、第1平面と第2平面との間における平均屈折率を n_{av} としたときに、第1媒質の屈折率 n_1 が「 $n_{av} - 0.2 \leq n_1 \leq n_{av} + 0.2$ 」なる関係式を満たすのが好適であり、さらに、第4媒質の屈折率 n_4 が「 $n_{av} - 0.2 \leq n_4 \leq n_{av} + 0.2$ 」なる関係式を満たすのが好適である。また、第1平面に垂直な方向についての第1媒質の厚みが5μm以上であるのが好適であり、さらに、第1平面に垂直な方向についての第4媒質の厚みが5μm以上であるのが好適である。これらの場合には、回折効率の向上および回折効率の

偏波依存性の低減を広い波長域で実現する上で更に好ましい。

【0011】 第2の発明に係る回折格子素子は、(1) 互いに平行に順に並んだ第1～第4平面を仮想したときに、第1平面より外側に第1平面に接して設けられた第1媒質（屈折率 n_1 ）と、(2) 第2平面と第3平面との間に、第2平面および第3平面に接して、第1平面に平行な所定方向に交互に設けられて回折格子を形成している第2媒質（屈折率 n_2 ）および第3媒質（屈折率 n_3 、ただし、 $n_3 < n_2$ ）と、(3) 第4平面より外側に第4平面に接して設けられた第4媒質（屈折率 n_4 ）と、(4) 第1平面と第2平面との間に、第1平面および第2平面に接して設けられた第5媒質（平均屈折率 n_5 ）と、(5) 第3平面と第4平面との間に、第3平面および第4平面に接して設けられた第6媒質（平均屈折率 n_6 ）と、を備える。そして、第2平面と第3平面との間における平均屈折率を n_{av} としたときに、第5媒質の平均屈折率 n_5 が「 $n_1 < n_5 < n_{av}$ 」または「 $n_{av} < n_5 < n_1$ 」なる関係式を満たし、第6媒質の平均屈折率 n_6 が「 $n_4 < n_6 < n_{av}$ 」または「 $n_{av} < n_6 < n_4$ 」なる関係式を満たすことを特徴とする。

【0012】 この第2の発明に係る回折格子素子では、第5媒質と第6媒質との間において、第2媒質と第3媒質とが交互に設けられて回折格子が形成されている。第1媒質から回折格子へ入射した光は、第5媒質を経て、回折格子部において回折され、第6媒質を経て、第4媒質へ出射される。或いは、第4媒質から回折格子へ入射した光は、第6媒質を経て、回折格子部において回折され、第5媒質を経て、第1媒質へ出射される。この回折格子素子は、各媒質の屈折率が上記関係式を満たしていることから、回折効率の向上および回折効率の偏波依存性の低減を広い波長域で実現することができる。

【0013】 第2の発明に係る回折格子素子は、第5媒質の平均屈折率 n_5 が「 $(n_1 n_{av})^{1/2} - 0.2 < n_5 < (n_1 n_{av})^{1/2} + 0.2$ 」なる関係式を満たすのが好適であり、さらに、第6媒質の平均屈折率 n_6 が「 $(n_4 n_{av})^{1/2} - 0.2 < n_6 < (n_4 n_{av})^{1/2} + 0.2$ 」なる関係式を満たすのが好適である。また、回折格子の周期を Λ とし、

第1平面に垂直な方向についての第5媒質の厚みを h_5 とし、波長 λ の光が回折格子に入射するとしたときに、「 $\lambda\Lambda/4(4n_5^2\Lambda^2-\lambda^2)^{1/2} < h_5 < 3\lambda\Lambda/4(4n_5^2\Lambda^2-\lambda^2)^{1/2}$ 」なる関係式を満たす光の波長 λ が波長帯域 $1.26\mu\text{m} \sim 1.675\mu\text{m}$ 内に存在するのが好適であり、さらに、回折格子の周期を Λ とし、第1平面に垂直な方向についての第6媒質の厚みを h_6 とし、波長 λ の光が回折格子に入射するとしたときに、「 $\lambda\Lambda/4(4n_6^2\Lambda^2-\lambda^2)^{1/2} < h_6 < 3\lambda\Lambda/4(4n_6^2\Lambda^2-\lambda^2)^{1/2}$ 」なる関係式を満たす光の波長 λ が波長帯域 $1.26\mu\text{m} \sim 1.675\mu\text{m}$ 内に存在するのが好適である。これらの場合には、回折効率の向上および回折効率の偏波依存性の低減を広い信号光波長域で実現する上で更に好ましい。

【0014】また、第5媒質が所定方向に交互に設けられた複数の媒質からなるのが好適であり、さらに、第6媒質が所定方向に交互に設けられた複数の媒質からなるのが好適である。この場合には、回折特性の向上を図ることができるとともに、回折格子素子を製造する上で好都合である。

【0015】第3の発明に係る回折格子素子は、(1)互いに平行に順に並んだ第1～第3平面を仮想したときに、第1平面より外側に第1平面に接して設けられた第1媒質(屈折率 n_1)と、(2)第2平面と第3平面との間に、第2平面および第3平面に接して、第1平面に平行な所定方向に交互に設けられて回折格子を形成している第2媒質(屈折率 n_2)および第3媒質(屈折率 n_3 、ただし、 $n_3 < n_2$)と、(3)第3平面より外側に第3平面に接して設けられた第4媒質(屈折率 n_4)と、(5)第1平面と第2平面との間に、第1平面および第2平面に接して設けられた第5媒質(平均屈折率 n_5)と、を備える。そして、第1平面と第2平面との間における平均屈折率を n_{av} としたときに、第5媒質の平均屈折率 n_5 が「 $n_1 < n_5 < n_{av}$ 」または「 $n_{av} < n_5 < n_1$ 」なる関係式を満たすことを特徴とする。

【0016】この第3の発明に係る回折格子素子では、第4媒質と第5媒質との間において、第2媒質と第3媒質とが交互に設けられて回折格子が形成されている。第1媒質から回折格子へ入射した光は、第5媒質を経て、回折格子部にお

5

いて回折され、第4媒質へ出射される。或いは、第4媒質から回折格子へ入射した光は、回折格子部において回折され、第5媒質を経て、第1媒質へ出射される。この回折格子素子は、各媒質の屈折率が上記関係式を満たしていることから、回折効率の向上および回折効率の偏波依存性の低減を広い波長域で実現することができる。

10

【0017】 第3の発明に係る回折格子素子は、第5媒質の平均屈折率 n_5 が $(n_1 n_{av})^{1/2} - 0.2 < n_5 < (n_1 n_{av})^{1/2} + 0.2$ なる関係式を満たすのが好適である。回折格子の周期を Λ とし、第1平面に垂直な方向についての第5媒質の厚みを h_5 とし、波長 λ の光が回折格子に入射するとしたときに、「 $\lambda\Lambda / 4 (4 n_5^2 \Lambda^2 - \lambda^2)^{1/2} < h_5 < 3\lambda\Lambda / 4 (4 n_5^2 \Lambda^2 - \lambda^2)^{1/2}$ 」なる関係式を満たす光の波長 λ が波長帯域 $1.26\mu m \sim 1.675\mu m$ 内に存在するのが好適である。第2媒質、第3媒質および第4媒質それぞれの屈折率 $n_2 \sim n_4$ が $n_3 < n_4 < n_2$ なる関係式を満たすのが好適である。第4媒質の屈折率 n_4 が $n_{av} - 0.2 \leq n_4 \leq n_{av} + 0.2$ なる関係式を満たすのが好適である。また、第1平面に垂直な方向についての第4媒質の厚みが $5\mu m$ 以上であるのが好適である。これらの場合には、回折効率の向上および回折効率の偏波依存性の低減を広い波長域で実現する上で更に好ましい。

15

20

【0018】 第5媒質が所定方向に交互に設けられた複数の媒質からなるのが好適である。この場合には、回折特性の向上を図ることができるとともに、回折格子素子を製造する上で好都合である。

25

【0019】 第4の発明に係る回折格子素子は、ベース板と、ベース板上に設けられた第1の反射抑制部と、第1の反射抑制部上に設けられた回折格子部と、回折格子部上に設けられた第2の反射抑制部とを備え、第2の反射抑制部は第1の媒質に接しており、回折格子部において、ベース板に平行な所定方向に第2媒質及び第3媒質が交互に設けられることによって回折格子が設けられており、 $1.26\mu m \sim 1.675\mu m$ の波長帯域において反射率が 10% 以下となる波長が存

在する。この回折格子素子によれば、回折効率の向上および回折効率の偏波依存性の低減を広い波長域で実現することができる。

【0020】 第4の発明に係る回折格子素子において、回折格子部の回折能力は、前記回折格子部、前記第1の反射抑制部、及び前記第2の反射抑制部の全体の回折能力の50%より大きい。回折格子部の屈折率変調は、第1の反射抑制部及び第2の反射抑制部の屈折率変調より大きいことが好ましく、また、回折格子部の最大屈折率が、前記ベース板及び前記第1の媒質の屈折率より大きいことが好ましい。更に、回折格子の周期は、1.675μm以下であることが好ましい。

【0021】 第1～第4の発明に係る回折格子素子は、TE偏波光およびTM偏波光それぞれの回折効率が90%以上となる光の波長が存在するのが好適であり、また、TE偏波光およびTM偏波光それぞれの回折効率の差が5%以下となる光の波長が存在するのが好適である。これらの場合には、多波長の信号光を多重化して伝送する光通信システムにおいて、この回折格子素子が好適に用いられ得る。

【0022】 第1～第4の発明に係る回折格子素子は、第2媒質の屈折率n₂と第3媒質の屈折率n₃との差が0.7以上であるのが好適であり。第2媒質がTiO₂、Ta₂O₅およびNb₂O₅の何れかであるのが好適であり、第3媒質が気体であるのが好適である。これらの場合には、回折格子部の高さを低くすることができることから、回折格子素子の製造が容易である。

【0023】 第1～第4の発明に係る回折格子素子は、第2媒質または第3媒質がエネルギー線照射により屈折率が変化し得る所定材料からなるのが好適であり、所定材料がダイヤモンド様炭素であるのが好適である。これらの場合には、所望の特性を有する回折格子素子を容易に製造することができる。

【0024】 第1の発明に係る回折格子素子は、第1媒質または第4媒質が、第2媒質または第3媒質よりエッチングレートが遅い所定材料からなるのが好適である。第2の発明に係る回折格子素子は、第5媒質または第6媒質が、第2媒

質または第3媒質よりエッチングレートが遅い所定材料からなるのが好適である。
第2の発明で、第5媒質または第6媒質をエッチングする場合、第1媒質または
第4媒質のエッチングレートが遅い所定材料からなるのが好適である。また、第
3の発明に係る回折格子素子は、第4媒質または第5媒質が、第2媒質または第
3媒質よりエッチングレートが遅い所定材料からなるのが好適である。第3の發
明で、第5媒質をエッチングする場合、第1媒質のエッチングレートが遅い所定
材料からなるのが好適である。このように、エッチング層に接する非エッチング
層のエッチングレートが遅い材料を用いるのが好ましく、例えば、エッチングレ
ート比が2倍以上であるのが好適である。ここで、上記所定材料が Al_2O_3 , MgO , Nd_2O_3 およびフッ素系化合物の何れかであるのが好適であり、また、第
2媒質または第3媒質が TiO_2 , Nb_2O_5 , Ta_2O_5 , SiN , SiO_2 , SiO ,
 ZrO_2 , Sb_2O_3 の何れかであるのが好適である。これらの場合には、回折格子
素子をエッチング法により製造する上で好ましい。

【0025】 本発明に係る回折格子素子製造方法は、上記の第1～第4の発明
に係る回折格子素子を製造する方法であって、エネルギー線照射により屈折率が変
化し得る所定材料からなる層を形成し、その層に対してエネルギー線を所定の空間
的強度変調パターンで照射して、その層において互いに屈折率が異なる第2媒質
および第3媒質が交互に設けられた回折格子を形成することを特徴とする。或い
は、所定材料からなる層を形成し、その層に対して所定の空間的パターンでエッ
チングして、その層において互いに屈折率が異なる第2媒質および第3媒質が交
互に設けられた回折格子を形成することを特徴とする。

【0026】 本発明の回折格子素子の設計方法は、所定方向に周期的に屈折率
が変化する回折格子部と、該回折格子部の上下の少なくとも一方に反射抑制部を
有する回折格子素子の設計方法であって、回折格子部及び反射抑制部を、各々に
含まれる媒質による平均屈折率を有する膜とし、かつ、回折格子部における光の
位相変化を90度に設定し、所望の波長において反射率が10%以下となるよう

に該回折格子素子の屈折率分布を導出する。この回折格子素子の設計方法によれば、実際に製造された回折格子素子の特性に近い解析結果を得ることができるので、回折格子素子を容易に設計することが可能となる。

図面の簡単な説明

- 5 図1は、第1実施形態に係る回折格子素子10の説明図である。
- 図2は、実施例1の回折格子素子10の回折特性を示すグラフである。
- 図3は、比較例1の回折格子素子の回折特性を示すグラフである。
- 図4は、実施例1の回折格子素子10の回折効率と第4媒質14の屈折率n4との関係を示すグラフである。
- 10 図5は、変形例1の回折格子素子10Aの説明図である。
- 図6は、変形例2の回折格子素子10Bの説明図である。
- 図7は、第2実施形態に係る回折格子素子20の説明図である。
- 図8は、実施例2の回折格子素子20の回折特性を示すグラフである。
- 図9は、変形例の回折格子素子20Aの説明図である。
- 15 図10は、実施例3の回折格子素子20Bの説明図である。
- 図11は、実施例3の回折格子素子20Bの回折特性を示すグラフである。
- 図12は、第3実施形態に係る回折格子素子30の説明図である。
- 図13は、実施例4の回折格子素子30Aの説明図である。
- 図14は、実施例4の回折格子素子30Aの回折特性を示すグラフである。
- 20 図15は、第4実施形態に係る回折格子素子40の説明図である。
- 図16は、第4実施形態に係る回折格子素子の反射0次回折効率と等価モデルの反射0次回折効率の特性を示すグラフである。
- 図17は、実施例5に係る回折格子素子40Aの説明図である。
- 図18は、実施例6に係る回折格子素子40Bの説明図である。
- 25 図19は、第4実施形態に係る回折格子素子の回折効率を示すグラフである。
- 図20は、第4実施形態に係る回折格子素子における回折格子部の溝のアスペク

ト比を示すグラフである。

図21は、第4実施形態に係る回折格子素子の溝深さトレランスを示すグラフである。

図22は、変形態様に係る回折格子素子30Bの説明図である。

5 好適な実施例の説明

【0027】以下、添付図面を参照して本発明の実施の形態を詳細に説明する。

なお、図面の説明において同一の要素には同一の符号を付し、重複する説明を省略する。

【0028】(第1実施形態)

【0029】先ず、本発明に係る回折格子素子の第1実施形態について説明する。図1は、第1実施形態に係る回折格子素子10の説明図である。この図は、格子に垂直な面で切断したときの回折格子素子10の断面を示している。この図に示される回折格子素子10は、第1媒質11、第2媒質12、第3媒質13および第4媒質14を備えて構成されている。

【0030】この回折格子素子10において、互いに平行な第1平面P₁および第2平面P₂を仮想する。このとき、第1媒質11は、第1平面P₁より外側(図では上側)に第1平面P₁に接して設けられている。第2媒質12および第3媒質13は、第1平面P₁と第2平面P₂との間に、第1平面P₁および第2平面P₂に接して、第1平面P₁に平行な所定方向に交互に設けられていて、回折格子を形成している。また、第4媒質14は、第2平面P₂より外側(図では下側)に第2平面P₂に接して設けられている。第2媒質12および第3媒質13の双方が固体であり、或いは、第1媒質11または第4媒質14が等方性材料からなる。

【0031】この回折格子素子10では、第1媒質11と第4媒質14との間において、第2媒質12と第3媒質13とが交互に設けられて回折格子が形成されている。第1媒質11から回折格子へ入射した光L_i(入射角θ)は、回折格子部において回折され、第4媒質14へ出射される(図1には、0次光L_d、

1 次回折光 L_d が示されている)。或いは、第4媒質14から回折格子へ入射した光は、回折格子部において回折され、第1媒質11へ出射される。

【0032】 第2媒質12の各領域および第3媒質13の各領域は、何れも断面が長方形である。第2媒質12および第3媒質13が所定方向に交互に設けられることによって回折格子が形成された回折格子部において、その回折格子の周期を Λ とし、その周期 Λ における第2媒質12が占める割合(デューティ比)を f とする。第1平面 P_1 と第2平面 P_2 との間の距離(すなわち、格子の高さ)を H とする。第1媒質11の屈折率を n_1 とし、第2媒質12の屈折率を n_2 とし、第3媒質13の屈折率を n_3 (ただし、 $n_3 < n_2$) とし、第4媒質14の屈折率を n_4 とする。

【0033】 このとき、第1平面 P_1 と第2平面 P_2 との間の回折格子部の平均屈折率 n_{av} は、

$$n_{av} = \sqrt{f n_2^2 + (1-f) n_3^2} \quad \cdots (1)$$

なる式で表される。また、この平均屈折率 n_{av} は、第2媒質12の屈折率 n_2 および第3媒質13の屈折率 n_3 との間で、

$$n_3 < n_{av} < n_2 \quad \cdots (2)$$

なる関係式を満たす。

【0034】 そして、回折格子の周期 Λ が入射光の波長 λ のオーダー以下(例えば 2λ 以下)であれば、第1平面 P_1 および第2平面 P_2 それぞれでの光の反射を考える際に、第1平面 P_1 と第2平面 P_2 との間を屈折率 n_{av} の均質な媒質で置き換えることができる。このとき、第1媒質11の屈折率 n_1 または第4媒質14の屈折率 n_4 が回折格子部の平均屈折率 n_{av} に近いほど、第1平面 P_1 または第2平面 P_2 における反射が低減され、回折特性が向上する。

【0035】 そこで、本実施形態では、各媒質の屈折率 $n_1 \sim n_4$ は、

$$n_3 < n_1 < n_2, \quad n_3 \leq n_4 \leq n_2 \quad \cdots (3a)$$

または

$$n_3 \leq n_1 \leq n_2, \quad n_3 < n_4 < n_2 \quad \cdots (3b)$$

なる関係式を満たすものとされている。さらに、各媒質の屈折率 $n_1 \sim n_4$ は、

$$n_{av} - 0.2 \leq n_1 \leq n_{av} + 0.2 \quad \cdots (4a)$$

または

$$n_{av} - 0.2 \leq n_4 \leq n_{av} + 0.2 \quad \cdots (4b)$$

なる関係式を満たすのが好適である。

【0036】 上記(3)式または(4)式に従って各媒質の屈折率 $n_1 \sim n_4$ が決定され、その後、厳密結合波解析法 (R C W A: Rigorous Coupled-Wave Analysis) により回折格子素子 10 の回折特性の解析が行なわれる。そして、最適化手法(例えば、非線形計画法、シミュレーティドアニーリング法、遺伝アルゴリズムなど)により、デューティ比 f、格子周期 Λ および格子高さ H が最適化されることで、回折特性が優れた回折格子素子 10 が設計される。

【0037】 次に、第 1 実施形態に係る回折格子素子 10 の実施例について、比較例とともに説明する。実施例 1 の回折格子素子 10 は、第 1 媒質 11 および第 4 媒質 14 それぞれが石英ガラス ($n_1 = n_4 = 1.45$) であり、第 2 媒質 12 の屈折率 n_2 が 1.75 であり、第 3 媒質 13 が空気 ($n_3 = 1$) であり、デューティ比 f が 0.70 であり、格子周期 Λ が 1.01 μm であり、格子高さ H が 2.26 μm である。比較例 1 の回折格子素子は、第 1 媒質および第 3 媒質それぞれが空気 ($n_1 = n_3 = 1$) であり、第 2 媒質および第 4 媒質それぞれが石英ガラス ($n_2 = n_4 = 1.45$) であり、デューティ比 f が 0.84 であり、格子周期 Λ が 1.01 μm であり、格子高さ H が 6.02 μm である。

【0038】 図 2 は、実施例 1 の回折格子素子 10 の回折特性を示すグラフで

ある。図3は、比較例1の回折格子素子の回折特性を示すグラフである。これらの図には、光の入射角 θ が波長 $1.55\mu m$ におけるプラグ入射角であるときの回折効率の波長依存性がTE偏波光およびTM偏波光それぞれについて示されている。なお、プラグ入射角は、0次光および1次光それぞれの角度が等しくなる入射角をいう。また、これら実施例1および比較例1それぞれにおいては、波長帯域 $1.52\mu m \sim 1.57\mu m$ において、回折効率の偏波依存性および波長依存性ができる限り小さく、回折効率ができる限り大きくなるように、各パラメータが設計された。

【0039】これらの図を対比して判るように、比較例1の場合（図3）と比較して、実施例1の場合（図2）には、広い波長域で、TE偏波光およびTM偏波光それぞれの回折効率が高く95%以上であり、TE偏波光およびTM偏波光それぞれの回折効率の差が2%以下であった。このように、本実施形態に係る回折格子素子10は、回折効率の向上および回折効率の偏波依存性の低減を広い波長域で実現することができる。

【0040】図4は、実施例1の回折格子素子10の回折効率と第4媒質14の屈折率 n_4 との関係を示すグラフである。ここでは、波長 λ は $1.55\mu m$ に固定された。この図から判るように、第4媒質14の屈折率 n_4 が上記(4b)式の関係式を満たす場合には、回折効率が大きく、偏波依存性が小さい。

【0041】次に、第1実施形態に係る回折格子素子10を製造する方法について幾つか説明する。

【0042】第1の製造方法では、第4媒質14の面上に第2媒質12からなる層を形成し、その層に対して所定の空間的パターンでエッチングにより溝を形成し、その上に第1媒質11を貼り合わせる。この場合、エッチングにより形成された溝の領域が、空気からなる第3媒質13となる。或いは、エッチングにより形成された溝の領域にCVD（Chemical Vapor Deposition）法等により第3領域13となるべき他の材料を埋め込み、研磨等により第2領域12および第3領

域1 3 それぞれの高さを揃えて、その上に第1 媒質1 1 を設けてもよい。ここで、第2 領域1 2 および第3 領域1 3 の双方が固体であれば、第1 媒質1 1 に貼り合わせる際の圧力による溝形状の変形を抑制することができ、また、CVD法等で第1 媒質1 1 を設ける際にも溝への第1 媒質1 1 の入り込みを抑制することができて、好適である。なお、第4 媒質1 4 の面上に第2 媒質1 2 からなる層を形成するのでは無く、第3 媒質1 3 からなる層を形成してもよい。

【0043】 第2 媒質1 2 または第3 媒質1 3 からなる層がエッティングされる際に、第4 媒質1 4 が、第2 媒質1 2 または第3 媒質1 3 よりエッティングレートが遅い所定材料からなるのが好ましく、この場合には、第4 媒質1 4 の上面（第2 平面P₂）でエッティングを終了させることができる。このような観点から、例えば、第4 媒質1 4 は、Al₂O₃, MgO, Nd₂O₃ およびフッ素系化合物（AlF₃, MgF₂, CaF₂, NdF₃など）の何れかであるのが好ましい。また、第2 媒質1 2 または第3 媒質1 3 は、Ti₂, Nb₂O₅, Ta₂O₅, SiN, SiO₂, SiO, ZrO₂, Sb₂O₃の何れかであるのが好ましい。

【0044】 なお、上記のエッティングに替えてリフトオフ等により第2 媒質1 2 および第3 媒質1 3 が交互に形成されてもよい。

【0045】 エッティングおよびリフトオフの何れの場合にも、格子高さHが低いほど溝形成が容易である。第1 実施形態では、各媒質の屈折率n₁～n₄ それを独立に設定することができるから、第2 媒質1 2 の屈折率n₂と第3 媒質1 3 の屈折率n₃との差（n₂-n₃）を大きくすることができ、したがって、格子高さHを低くすることができる。このような観点から、第2 媒質1 2 の屈折率n₂と第3 媒質1 3 の屈折率n₃との差（n₂-n₃）が0.7以上であれば、格子高さHを3μm以下とすることができる製造が容易となるので好適である。また、その為には、第2 媒質1 2 がTiO₂, Ta₂O₅ およびNb₂O₅の何れかであるのが好適であり、第3 媒質1 3 が気体であるのが好適である。また、第2 媒質、第3 媒質とともに固体の場合、第3 媒質としてMgF₂（屈折率1.35）のような低屈折率

材料を用い、第2媒質として半導体、例えばSi（屈折率3.5）のような高屈折率材料を用いれば、さらに好適である。

【0046】 第2の製造方法では、第4媒質14の面上に、エネルギー線（例えばX線や粒子線など）の照射により屈折率が変化し得る所定材料からなる層を形成し、その層に対してエネルギー線を所定の空間的強度変調パターンで照射して、その層において互いに屈折率が異なる第2媒質12および第3媒質13が交互に設けられた回折格子を形成し、その上に第1媒質11を設ける。或いは、所定材料からなる層の上に第1媒質11を設け、その後に、その層に対してエネルギー線を所定の空間的強度変調パターンで照射して、その層において互いに屈折率が異なる第2媒質12および第3媒質13が交互に設けられた回折格子を形成するのも好適である。

【0047】 エネルギ線照射により屈折率が変化し得る所定材料としてダイヤモンド様炭素（DLC: Diamond-Like Carbon）が好適に用いられる。この場合、このダイヤモンド様炭素の屈折率を変化させる為に照射されるエネルギー線として、シンクロトロン放射光（SR光: Synchrotron Radiation）や水素イオンビームが用いられ、エネルギー線が照射されたダイヤモンド様炭素の領域の屈折率が大きくなる。すなわち、エネルギー線が照射されていない領域が第3媒質13（屈折率 n_3 ）となり、エネルギー線が照射された領域が第2媒質12（屈折率 n_2 ）となる。

【0048】 この第2の製造方法は、第1の製造方法と比較して、回折格子素子10の製造が簡略である点で好適である。また、第1の製造方法では、エッチングにより形成される溝の断面形状を完全な長方形とするのは困難であるが、これに対して、第2の製造方法では、第2媒質12および第3媒質13それぞれの各領域の断面形状がより完全な長方形となり得る点でも好適である。

【0049】 次に、第1実施形態に係る回折格子素子10の変形例について説明する。図5は、変形例1の回折格子素子10Aの説明図である。この図に示される変形例1の回折格子素子10Aは、上述した回折格子素子10の構成に対し

て、第1媒質11（屈折率 n_1 ）の外側（図では上側）に反射低減膜11aが形成され、更に反射低減膜11aの外側に媒質11b（屈折率 n_0 ）が存在し、また、第4媒質14（屈折率 n_4 ）の外側（図では下側）に反射低減膜14aが形成され、更に反射低減膜14aの外側に媒質14b（屈折率 n_5 ）が存在するものである。

5 例えば、外側の媒質11bおよび媒質14bは、空気であり、或いは、回折格子素子10A全体の線膨張係数を調整して光学特性の温度依存性を低減する為の光学ガラスである。

【0050】 この変形例1の回折格子素子10Aでは、回折格子において発生するエバネセント波が充分に減衰するように、第1媒質11および第4媒質14それぞれの厚み（第1平面P₁に垂直な方向についての厚み）は、波長 λ より充分に厚いのが好ましい。例えば、波長 λ が1.55μmであれば、第1媒質11および第4媒質14それぞれの厚みは5μm以上であるのが好適である。また、第1媒質11と外側の媒質11bとの間に反射低減膜11aが設けられ、また、第4媒質14と外側の媒質14bとの間に反射低減膜14aが設けられていることにより、これらの界面での反射が低減されて、回折特性の低下が抑制される。

【0051】 ここで、第1媒質11または第4媒質14が異方性材料からなる場合、偏波モード分散が発生し又は偏波状態が変化するので、光通信に影響を及ぼす。しかし、第1媒質11および第4媒質14を等方性材料のものとすることで、これらの影響を抑制することができ、また、反射低減膜11aや反射低減膜14aにおける反射低減の為の設計も容易になる。

【0052】 図6は、変形例2の回折格子素子10Bの説明図である。図6においては、入射光L_i、第4媒質14と媒質14bとの境界からの反射光L_r、回折光L_dそれぞれの軌跡が例示されている。この図に示される変形例2の回折格子素子10Bは、上述した回折格子素子10の構成に対して、第1媒質11（屈折率 n_1 ）の外側（図では上側）に媒質11b（屈折率 n_0 ）が存在し、また、第4媒質14（屈折率 n_4 ）の外側（図では下側）に媒質14b（屈折率 n_5 ）が存在す

るものである。例えば、外側の媒質 1 1 b および媒質 1 4 b は、空気であり、或いは、回折格子素子 1 0 A 全体の線膨張係数を調整して光学特性の温度依存性を低減する為の光学ガラスである。特に、この変形例 2 の回折格子素子 1 0 B では、回折格子部での反射光・透過光・回折光が再び回折格子部に入射しないように、第 1 媒質 1 1 および第 4 媒質 1 4 それぞれは充分な厚みを有している。このことにより、回折特性の低下が抑制される。

【0053】 (第 2 実施形態)

【0054】 次に、本発明に係る回折格子素子の第 2 実施形態について説明する。図 7 は、第 2 実施形態に係る回折格子素子 2 0 の説明図である。この図は、格子に垂直な面で切断したときの回折格子素子 2 0 の断面を示している。この図に示される回折格子素子 2 0 は、第 1 媒質 2 1、第 2 媒質 2 2、第 3 媒質 2 3、第 4 媒質 2 4、第 5 媒質 2 5 および第 6 媒質 2 6 を備えて構成されている。

【0055】 この回折格子素子 2 0において、互いに平行で順に並んだ第 1 平面 P_1 、第 2 平面 P_2 、第 3 平面 P_3 および第 4 平面 P_4 を仮想する。このとき、第 1 媒質 2 1 は、第 1 平面 P_1 より外側（図では上側）に第 1 平面 P_1 に接して設けられている。第 2 媒質 2 2 および第 3 媒質 2 3 は、第 2 平面 P_2 と第 3 平面 P_3 との間に、第 2 平面 P_2 および第 3 平面 P_3 に接して、第 1 平面 P_1 に平行な所定方向に交互に設けられて、回折格子を形成している。第 4 媒質 2 4 は、第 4 平面 P_4 より外側（図では下側）に第 4 平面 P_4 に接して設けられている。第 5 媒質 2 5 は、第 1 平面 P_1 と第 2 平面 P_2 との間に、第 1 平面 P_1 および第 2 平面 P_2 に接して設けられている。第 6 媒質 2 6 は、第 3 平面 P_3 と第 4 平面 P_4 との間に、第 3 平面 P_3 および第 4 平面 P_4 に接して設けられている。

【0056】 この回折格子素子 2 0 では、第 5 媒質 2 5 と第 6 媒質 2 6 との間において、第 2 媒質 2 2 と第 3 媒質 2 3 とが交互に設けられて回折格子が形成されている。第 1 媒質 2 1 から回折格子へ入射した光は、第 5 媒質 2 5 を経て、回折格子部において回折され、第 6 媒質 2 6 を経て、第 4 媒質 2 4 へ出射される。

或いは、第4媒質24から回折格子へ入射した光は、第6媒質26を経て、回折格子部において回折され、第5媒質25を経て、第1媒質21へ出射される。

【0057】 第2媒質22の各領域および第3媒質23の各領域は、何れも断面が長方形である。第2媒質22および第3媒質23が所定方向に交互に設けられることによって回折格子が形成された回折格子部において、その回折格子の周期を Λ とし、その周期 Λ における第2媒質22が占める割合(デューティ比)を f とする。第1平面 P_1 と第2平面 P_2 との間の距離(すなわち、第5媒質25の厚み)を h_5 とする。第2平面 P_2 と第3平面 P_3 との間の距離(すなわち、格子の高さ)を H とする。第3平面 P_3 と第4平面 P_4 との間の距離(すなわち、第6媒質26の厚み)を h_6 とする。第1媒質21の屈折率を n_1 とし、第2媒質22の屈折率を n_2 とし、第3媒質23の屈折率を n_3 (ただし、 $n_3 < n_2$)とし、第4媒質24の屈折率を n_4 とし、第5媒質25の屈折率を n_5 とし、第6媒質26の屈折率を n_6 とする。

【0058】 このとき、第2平面 P_2 と第3平面 P_3 との間の回折格子部の平均屈折率 n_{av} は上記(1)式で表される。また、この平均屈折率 n_{av} は、第2媒質22の屈折率 n_2 および第3媒質23の屈折率 n_3 との間で、上記(2)式の関係式を満たす。

【0059】 第5媒質25および第6媒質26それぞれは、反射低減の為の多層膜であってもよいし、単層の膜であってもよい。単層膜であるとき、第5媒質25の屈折率 n_5 は、

$$n_1 < n_5 < n_{av} \text{ または } n_{av} < n_5 < n_1 \quad \cdots (5)$$

なる関係式を満たし、第6媒質26の屈折率 n_6 は、

$$n_4 < n_6 < n_{av} \text{ または } n_{av} < n_6 < n_4 \quad \cdots (6)$$

なる関係式を満たす。本実施形態に係る回折格子素子20は、このように設定さ

れていることにより、各界面での反射が低減されて、回折特性の低下が抑制される。

【0060】 さらに、第5媒質25の屈折率 n_5 は、

$$\sqrt{n_1 n_{av}} - 0.2 < n_5 < \sqrt{n_1 n_{av}} + 0.2 \quad \cdots (7)$$

5 なる関係式を満たすのが好適である。また、第6媒質26の屈折率 n_6 は、

$$\sqrt{n_4 n_{av}} - 0.2 < n_6 < \sqrt{n_4 n_{av}} + 0.2 \quad \cdots (8)$$

なる関係式を満たすのが好適である。

【0061】 また、界面での反射を広い波長帯域で低減する為には、第5媒質25の高さ h_5 および第6媒質26の高さ h_6 それぞれは、波長オーダー以下であることが好ましく、例えば5μm以下であるのが好適である。

【0062】 特に、第5媒質25中における波長 λ の光の角度を θ_5 とすると、第5媒質25の厚み h_5 は、

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{\lambda}{4n_5 \cos \theta_5} < h_5 < \frac{3}{2} \cdot \frac{\lambda}{4n_5 \cos \theta_5} \quad \cdots (9)$$

15 なる関係式を満たすのが好適である。また、第6媒質26中における波長 λ の光の角度を θ_6 とすると、第6媒質26の厚み h_6 は、

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{\lambda}{4n_6 \cos \theta_6} < h_6 < \frac{3}{2} \cdot \frac{\lambda}{4n_6 \cos \theta_6} \quad \cdots (10)$$

なる関係式を満たすのが好適である。

【0063】 また、光がブリッジ角で入射するとすれば、上記(9)式は、

$$\frac{\lambda\Lambda}{4\sqrt{4n_s^2\Lambda^2 - \lambda^2}} < h_s < \frac{3\lambda\Lambda}{4\sqrt{4n_s^2\Lambda^2 - \lambda^2}} \quad \cdots (11)$$

なる式で表され、上記(10)式は、

$$\frac{\lambda\Lambda}{4\sqrt{4n_6^2\Lambda^2 - \lambda^2}} < h_6 < \frac{3\lambda\Lambda}{4\sqrt{4n_6^2\Lambda^2 - \lambda^2}} \quad \cdots (12)$$

なる式で表される。なお、上記(11)式および(12)式それぞれは、プラグ入射角を仮定した場合に導出されるものであるが、プラグ入射角で無い場合にも近似的に当てはまる。

【0064】 上記(5)式～(12)式の何れかに従って各媒質の屈折率 $n_1 \sim n_6$ および厚み h_s, h_6 が決定され、その後、RCWA法により回折格子素子20の回折特性の解析が行なわれる。そして、最適化手法により、デューティ比 f 、格子周期 Λ および格子高さ H が最適化されることで、回折特性が優れた回折格子素子20が設計される。

【0065】 なお、以上では第5媒質25および第6媒質26それが均一な単層膜であるとして説明してきたが、第5媒質25または第6媒質26が反射低減の為の多層膜であってもよい。後者の場合、TE偏波光およびTM偏波光それぞれの反射が抑制されて回折効率が向上し、多層膜の偏波依存性を利用することにより回折効率の偏波依存性を低減することができ、また、高次回折光やエバネセント波に対しても反射低減効果を期待することができる。

【0066】 次に、第2実施形態に係る回折格子素子20の実施例について説明する。実施例2の回折格子素子20は、第1媒質21が空気 ($n_1 = 1$) であり、第2媒質22がDLCのSR光照射部 ($n_2 = 2.15$) であり、第3媒質23がDLCのSR光非照射部 ($n_3 = 1.55$) であり、第4媒質24が石英ガラス ($n_4 = 1.45$) であり、第5媒質25が石英ガラス ($n_5 = 1.45$) であり、第6

媒質26がMgO ($n_6 = 1.70$) であった。デューティ比 f が0.74であり、格子周期 Λ が $1.01\mu\text{m}$ であり、格子高さ H が $3.35\mu\text{m}$ であり、第5媒質25の厚み h_5 が $0.30\mu\text{m}$ であり、第6媒質26の厚み h_6 が $0.23\mu\text{m}$ であった。

【0067】 図8は、実施例2の回折格子素子20の回折特性を示すグラフである。この図には、光の入射角 θ が波長 $1.55\mu\text{m}$ におけるプラグ入射角であるときの回折効率の波長依存性がTE偏波光およびTM偏波光それぞれについて示されている。波長帯域 $1.52\mu\text{m} \sim 1.57\mu\text{m}$ において、回折効率の偏波依存性および波長依存性ができる限り小さく、回折効率ができる限り大きくなるように、各パラメータが設計された。この図から判るように、実施例2の場合にも、広い波長域で、TE偏波光およびTM偏波光それぞれの回折効率が高く95%以上であり、TE偏波光およびTM偏波光それぞれの回折効率の差が2%以下であった。このように、本実施形態に係る回折格子素子20は、回折効率の向上および回折効率の偏波依存性の低減を広い波長域で実現することができる。

【0068】 次に、第2実施形態に係る回折格子素子20を製造する方法について説明する。第1実施形態の場合と略同様に、第2実施形態に係る回折格子素子20は、エッティング法やリフトオフ法を用いる第1の製造方法や、エネルギー線の照射により屈折率が変化し得る所定材料を用いる第2の製造方法により、製造することができる。ただし、第2実施形態では、第6媒質26は、第2媒質22または第3媒質23よりエッチングレートが遅い所定材料からなるのが好ましく、 Al_2O_3 , MgO, Nd_2O_3 およびフッ素系化合物 (AlF_3 , MgF_2 , CaF_2 , NdF_3 など) の何れかであるのが好ましい。

【0069】 次に、第2実施形態に係る回折格子素子20の変形例について説明する。回折格子素子20の変形例では、第5媒質25および第6媒質26の双方または何れか一方が所定方向に交互に設けられた複数の媒質からなる。

【0070】 図9は、変形例の回折格子素子20Aの説明図である。この図に示される変形例の回折格子素子20Aは、上述した回折格子素子20の構成に対

して、第5媒質25および第6媒質26の双方が所定方向に交互に設けられた複数の媒質からなるものである。ここで、所定方向は、第2媒質22および第3媒質23が交互に設けられている方向と同じである。

【0071】 第5媒質25は、媒質25a（屈折率 n_{5a} ）と媒質25b（屈折率 n_{5b} ）とが Λ_5 で交互に設けられている。第6媒質26は、媒質26a（屈折率 n_{6a} ）と媒質26b（屈折率 n_{6b} ）とが Λ_6 で交互に設けられている。第5媒質25の周期 Λ_5 における媒質25aが占める割合（デューティ比）を f_5 とし、第6媒質26の周期 Λ_6 における媒質26aが占める割合（デューティ比）を f_6 とする。なお、第5媒質25の周期 Λ_5 および第6媒質26の周期 Λ_6 それぞれは、第2媒質22および第3媒質23からなる回折格子部の周期 Λ と等しいのが好適であり、或いは、周期 Λ の整数分の1であるのが好適である。また、第5媒質25の周期 Λ_5 および第6媒質26の周期 Λ_6 それぞれは、入射光の波長 λ と比べて充分に小さいのが好適であり、例えば波長 λ の1/5以下であるのが好適である。

【0072】 このとき、第5媒質25の平均屈折率 n_5 は、

$$n_5 = \sqrt{f_5 n_{5a}^2 + (1 - f_5) n_{5b}^2} \quad \cdots (13)$$

15

なる式で表され、第6媒質26の平均屈折率 n_6 は、

$$n_6 = \sqrt{f_6 n_{6a}^2 + (1 - f_6) n_{6b}^2} \quad \cdots (14)$$

なる式で表される。上記(13)式、(14)式で表される平均屈折率 n_5 、 n_6 を用いることで、既述した回折格子素子20（図7）と同様の議論が可能となる。

20

【0073】 次に、この変形例の回折格子素子20の実施例について説明する。

図10は、実施例3の回折格子素子20Bの説明図である。この実施例3の回折格子素子20Bでは、第5媒質25は所定方向に交互に設けられた2つの媒質25a、25bからなり、第6媒質26は均一である。実施例3の回折格子素子2

OBは、第1媒質21が空気 ($n_1 = 1$) であり、第2媒質22が Ta_2O_5 ($n_2 = 2.0$) であり、第3媒質23が空気 ($n_3 = 1$) であり、第4媒質24が石英ガラス ($n_4 = 1.45$) であり、第5媒質25のうち媒質25aが石英ガラス ($n_{5a} = 1.45$) であって媒質25bが空気 ($n_{5b} = 1$) であり、第6媒質26が Al_2O_3 ($n_6 = 1.60$) であった。デューティ比 f および f_5 が 0.66 であり、格子周期 Δ が $1.01\mu m$ であり、格子高さ H が $1.49\mu m$ であり、第5媒質25の厚み h_5 が $0.36\mu m$ であり、第6媒質26の厚み h_6 が $0.34\mu m$ であった。

【0074】 図11は、実施例3の回折格子素子20Bの回折特性を示すグラフである。この図には、光の入射角 θ (図10参照) が波長 $1.55\mu m$ におけるプラグ入射角であるときの回折効率の波長依存性がTE偏波光およびTM偏波光それぞれについて示されている。波長帯域 $1.52\mu m \sim 1.57\mu m$ において、回折効率の偏波依存性および波長依存性ができる限り小さく、回折効率ができる限り大きくなるように、各パラメータが設計された。この図から判るように、実施例3の場合にも、広い波長域で、TE偏波光およびTM偏波光それぞれの回折効率が高く95%以上であり、TE偏波光およびTM偏波光それぞれの回折効率の差が2%以下であった。このように、本実施形態に係る回折格子素子20は、回折効率の向上および回折効率の偏波依存性の低減を広い波長域で実現することができる。

【0075】 また、実施例3では、第2媒質22および第5媒質25を同時にエッティングすることができるので、製造が容易である。この際、第6媒質26として第2媒質22および第5媒質25よりエッティングレートが遅い所定材料を用いることで、製造する上で更に好都合である。また、第2媒質22、第5媒質25および第6媒質26を同時にエッティングすることも可能であり、この場合には、第4媒質24のエッティングレートが遅いのが好適である。

【0076】 (第3実施形態)

【0077】 次に、本発明に係る回折格子素子の第3実施形態について説明す

る。図12は、第3実施形態に係る回折格子素子30の説明図である。この図は、格子に垂直な面で切断したときの回折格子素子30の断面を示している。この図に示される回折格子素子30は、第1媒質31、第2媒質32、第3媒質33、第4媒質34および第5媒質35を備えて構成されている。

【0078】この回折格子素子30において、互いに平行で順に並んだ第1平面 P_1 、第2平面 P_2 および第3平面 P_3 を仮想する。このとき、第1媒質31は、第1平面 P_1 より外側（図では上側）に第1平面 P_1 に接して設けられている。第2媒質32および第3媒質33は、第2平面 P_2 と第3平面 P_3 との間に、第2平面 P_2 および第3平面 P_3 に接して、第1平面 P_1 に平行な所定方向に交互に設けられて、回折格子を形成している。第4媒質34は、第3平面 P_3 より外側（図では下側）に第3平面 P_3 に接して設けられている。第5媒質35は、第1平面 P_1 と第2平面 P_2 との間に、第1平面 P_1 および第2平面 P_2 に接して設けられている。

【0079】この回折格子素子30では、第4媒質34と第5媒質35との間において、第2媒質32と第3媒質33とが交互に設けられて回折格子が形成されている。第1媒質31から回折格子へ入射した光は、第5媒質35を経て、回折格子部において回折され、第4媒質34へ出射される。或いは、第4媒質34から回折格子へ入射した光は、回折格子部において回折され、第5媒質35を経て、第1媒質31へ出射される。

【0080】第2媒質32の各領域および第3媒質33の各領域は、何れも断面が長方形である。第2媒質32および第3媒質33が所定方向に交互に設けられることによって回折格子が形成された回折格子部において、その回折格子の周期を Λ とし、その周期 Λ における第2媒質32が占める割合（デューティ比）を f とする。第1平面 P_1 と第2平面 P_2 との間の距離（すなわち、第5媒質35の厚み）を h_5 とする。第2平面 P_2 と第3平面 P_3 との間の距離（すなわち、格子の高さ）を H とする。第1媒質31の屈折率を n_1 とし、第2媒質32の屈折率を n_2 とし、第3媒質33の屈折率を n_3 （ただし、 $n_3 < n_2$ ）とし、第4媒質34の屈

折率を n_4 とし、第 5 媒質 3 5 の屈折率を n_5 とする。

【0081】 このとき、第 2 平面 P_2 と第 3 平面 P_3 との間の回折格子部の平均屈折率 n_{av} は上記(1)式で表される。また、この平均屈折率 n_{av} は、第 2 媒質 3 2 の屈折率 n_2 および第 3 媒質 3 3 の屈折率 n_3 との間で、上記(2)式の関係式を満たす。

【0082】 第 5 媒質 3 5 は、第 2 実施形態の場合と同様に、反射低減の為の多層膜であってもよいし、単層の膜であってもよい。単層膜であるとき、第 5 媒質 3 5 の屈折率 n_5 は上記(5)式の関係式を満たす。本実施形態に係る回折格子素子 3 0 は、このように設定されていることにより、この界面での反射が低減されて、回折特性の低下が抑制される。さらに、第 5 媒質 3 5 の屈折率 n_5 は上記(7)式の関係式を満たすのが好適である。

【0083】 また、界面での反射を広い波長帯域で低減する為には、第 5 媒質 3 5 の高さ h_5 は、波長オーダー以下であることが好ましく、例えば $5 \mu\text{m}$ 以下であるのが好適である。特に、第 5 媒質 3 5 中における波長 λ の光の角度を θ_5 とすると、第 5 媒質 3 5 の厚み h_5 は上記(9)式の関係式を満たすのが好適である。また、光がブラング角で入射するとすれば、上記(9)式は上記(11)式で表される。なお、上記(11)式は、ブラング入射角を仮定した場合に導出されるものであるが、ブラング入射角で無い場合にも近似的に当てはまる。

【0084】 一方、第 4 媒質 3 4 の屈折率 n_4 については、第 1 実施形態の場合と同様に、上記(3)式または(4)式を満たすのが好適である。本実施形態に係る回折格子素子 3 0 は、このように設定されていることにより、この界面での反射が低減されて、回折特性の低下が抑制される。

【0085】 上記の各式に従って各媒質の屈折率 $n_1 \sim n_3$ および厚み h_5 が決定され、その後、RCWA 法により回折格子素子 3 0 の回折特性の解析が行なわれる。そして、最適化手法により、デューティ比 f 、格子周期 Λ および格子高さ H が最適化されることで、回折特性が優れた回折格子素子 3 0 が設計される。

【0086】 なお、以上では第5媒質35が均一な単層膜であるとして説明してきたが、第5媒質35が反射低減の為の多層膜であってもよい。後者の場合、TE偏波光およびTM偏波光それぞれの反射が抑制されて回折効率が向上し、多層膜の偏波依存性を利用することにより回折効率の偏波依存性を低減することができ、また、高次回折光やエバネセント波に対しても反射低減効果を期待することができる。

【0087】 また、第2実施形態の変形例と同様に、本実施形態でも、第5媒質35は所定方向に交互に設けられた複数の媒質からなるものであってもよい。このとき、第5媒質35の平均屈折率 n_5 は上記(13)式で表される。上記(13)式で表される平均屈折率 n_5 を用いることで、既述した回折格子素子30と同様の議論が可能となる。

【0088】 次に、第3実施形態に係る回折格子素子30を製造する方法について説明する。第1実施形態の場合と同様に、第3実施形態に係る回折格子素子30は、エッチング法やリフトオフ法を用いる第1の製造方法や、エネルギー線の照射により屈折率が変化し得る所定材料を用いる第2の製造方法により、製造することができる。第4媒質34は、第2媒質32または第3媒質33よりエッチングレートが遅い所定材料からなるのが好ましく、 Al_2O_3 , MgO , Nd_2O_3 およびフッ素系化合物(AlF_3 , MgF_2 , CaF_2 , NdF_3 など)の何れかであるのが好ましい。

【0089】 次に、第3実施形態に係る回折格子素子30の実施例について説明する。図13は、実施例4の回折格子素子30Aの説明図である。この実施例4の回折格子素子30Aでは、第5媒質35は所定方向に交互に設けられた2つの媒質35a, 35bからなる。実施例4の回折格子素子30Aは、第1媒質31が空気($n_1=1$)であり、第2媒質32が Ta_2O_5 ($n_2=1.98$)であり、第3媒質33が空気($n_3=1$)であり、第4媒質34が石英ガラス($n_4=1.45$)であり、第5媒質35のうち媒質35aが石英ガラス($n_{5a}=1.45$)であ

って媒質35bが空気($n_{5b}=1$)であった。デューティ比 f および f_5 が0.60であり、格子周期 Λ が $1.01\mu m$ であり、格子高さ H が $1.45\mu m$ であり、第5媒質35の厚み h_5 が $0.33\mu m$ であった。

【0090】図14は、実施例4の回折格子素子30Aの回折特性を示すグラフである。この図には、光の入射角 θ (図13を参照)が波長 $1.55\mu m$ におけるプラグ入射角であるときの回折効率の波長依存性がTE偏波光およびTM偏波光それぞれについて示されている。波長帯域 $1.52\mu m \sim 1.57\mu m$ において、回折効率の偏波依存性および波長依存性ができる限り小さく、回折効率ができる限り大きくなるように、各パラメータが設計された。この図から判るように、実施例4の場合にも、広い波長域で、TE偏波光およびTM偏波光それぞれの回折効率が高く95%以上であり、TE偏波光およびTM偏波光それぞれの回折効率の差が2%以下であった。このように、本実施形態に係る回折格子素子30は、回折効率の向上および回折効率の偏波依存性の低減を広い波長域で実現することができる。また、実施例4では、第2媒質32および第5媒質35を同時にエッチングすることができるから、製造が容易である。

【0091】(第4実施形態)

【0092】本発明に係る回折格子素子の第4実施形態について説明する。図15は、第4実施形態に係る回折格子素子40の説明図である。この図は、格子に垂直な面で切断したときの回折格子素子40の断面を示している。この図に示される回折格子素子40は、ベース板41、第1の反射抑制部42、回折格子部43、及び第2の反射抑制部44を備えて構成されている。

【0093】この回折格子素子40では、ベース板41上に第1の反射抑制部42が設けられており、第1の反射抑制部42上に回折格子部43が設けられており、回折格子部43上に第2の反射抑制部44が設けられている。第2の反射抑制部44は、第1媒質45に接している。回折格子部43では、ベース板41に実質的に平行な所定方向において第2媒質43aと第3媒質43bとが交互に

設けられることによって回折格子が形成されている。第2の反射抑制部44においては、第2媒質43a上に媒質44a、第3媒質43b上に媒質44bが設けられている。この回折格子素子40は、反射率が10%以下となるように設計されたものである。

5 【0094】 この回折格子素子40では、第1媒質45から回折格子へ入射した光は、第2の反射抑制部44を経て、回折格子部43において回折され、第1の反射抑制部42を経て、ベース板41へ出射される。或いは、ベース板41から第1の反射抑制部42を経て回折格子へ入射した光は、回折格子部43において回折され、第2の反射抑制部44を経て、第1媒質45へ出射される。

10 【0095】 ここで回折格子部43は、以下のように定義される。すなわち、第2媒質43a及び第3媒質43bが交互に設けられた方向をx方向とし、第1の反射抑制部42、回折格子部43、及び第2の反射抑制部44が順に並ぶ方向をz方向とし、回折格子の周期を Λ とし、周期 Λ における第2媒質43aが占める割合（デューティ比）をf、z方向における第1の反射抑制部42の長さ（すなわち、第1の反射抑制部42の高さ）を h_{a,r_1} 、z方向における第2の反射抑制部44の長さ（すなわち、第2の反射抑制部44の高さ）を h_{a,r_2} 、z方向における回折格子部43の長さ（すなわち、格子の高さ）をHとする。

15 【0096】 そして、平均屈折率 $n_{av}(z)$

$$n_{av}(z) = \sqrt{\frac{\int_0^{\Lambda} n^2(x, z) dx}{\Lambda}} \quad \cdots(15)$$

20 屈折率変調 $\Delta n(z)$ を

$$\Delta n(z) = \sqrt{\frac{\Lambda \int_0^{\Lambda} \{n^2(x, z) - n^2_{av}(z)\}^2 dx}{\int_0^{\Lambda} n(x, z) dx}} \quad \cdots(16)$$

z方向における位置 z_1 から位置 z_2 までの回折能力 $P(z_1, z_2)$ を

$$P(z_1, z_2) = \int_{z_1}^{z_2} \Delta n(z) dz \quad \cdots(17)$$

とした場合に、回折格子部43は、その回折能力が、第1の反射抑制部42、回折格子部43、及び第2の反射抑制部44の全体の回折能力の50%より大きいものと定義される。また、反射抑制部での回折による特性悪化が小さくなるので、回折格子部43の屈折率変調は、第1の反射抑制部42及び前記第2の反射抑制部44の屈折率変調より大きいことが好ましい。更に、回折格子部の屈折率変調を容易に大きくできるので、回折格子部43の最大屈折率が、ベース板41及び第1媒質45の屈折率より大きいことが好ましい。また、更に、回折格子部43における回折格子の周期 Λ は、光の波長以下であれば、反射が低減されるだけでなく高次の回折が発生しなくなるので、1.675 μm以下であることが好ましい。

【0097】 回折格子素子40では、ベース板41が石英ガラス（屈折率：1.444）、回折格子部43の第2媒質43aがTa₂O₅（屈折率：2.107）、第2の反射抑制部44の媒質44aがSiO₂、第1媒質45、第3媒質43b、及び媒質44bが空気（屈折率：1）であるものとして、RCWA法により回折格子部43のf、Hが設計され、以下に述べる等価モデルによる解析法で反射抑制部のh_{a,r1}、h_{a,r2}が設計されている。

【0098】 等価モデルによる解析法とは、第1の反射抑制部42、回折格子部43、第2の反射抑制部44のそれぞれを、各々に含まれる媒質の平均屈折率をもつ单層膜と仮定し、かつ、回折格子部43での回折に伴う光の位相変化を90度と仮定し、回折格子素子40を多層膜に置き換えて、透過1次の回折効率、及び反射0次の回折効率を解析する方法である。この多層膜の透過率、反射率が、それぞれ回折格子素子40の透過1次回折効率、及び反射0次回折効率に相当する。よって、この等価モデルを用いることで、光学フィルタに代表される多層膜の設計理論が適用可能となり、回折格子素子40の反射0次回折効率の抑制設計

が容易にできる。最終的に解析精度の高いRCWA法を用いて、回折格子素子40全体で、 f 、 H 、 h_{ar1} 、 h_{ar2} の設計の微調整を行うとなお好適である。

【0099】 図16は、第4実施形態に係る回折格子素子の反射0次回折効率と等価モデルの反射0次回折効率の特性を示すグラフである。このグラフは、周期 $\Lambda = 1.0 \mu\text{m}$ 、 $f = 0.579$ 、 $H = 1.164 \mu\text{m}$ 、 $h_{ar2} = 0.252 \mu\text{m}$ 、 $h_{ar1} = -0.2 \mu\text{m}$ 、光の波長帯が1550nm帯(Cバンド帯)、光の入射角 $\theta = 50.58$ 度の条件において、実際に製造された回折格子素子40と上記等価モデルの両者の反射0次回折効率の特性を示している。ここで、 h_{ar1} は負の値となっているが、この絶対値が第1の反射抑制部の厚みを表し、符号は後述のように反射抑制部の構造を表している。図16において、実線で示される特性は実際に製造された回折格子素子40によるものであり、点線で示される特性は上記等価モデルを用いた解析結果によるものである。このグラフから明確なように、中心波長に微小な差があるものの、この等価モデルを用いた設計方法によれば、本実施形態の回折格子素子40の特性を正確に得ることができる。

【0100】 回折格子素子40は、上記の等価モデルを用いた設計方法を用い、 f 、 H 、 h_{ar1} 、 h_{ar2} の最適化が行われることによって設計されている。この設計においては、光の波長帯が1550nm帯(Cバンド帯)、光の入射角 $\theta = 50.58$ 度の条件において、 h_{ar1} が $-0.5 \mu\text{m} \sim 0.3 \mu\text{m}$ の範囲($0.1 \mu\text{m}$ 間隔)で最適化が行われている。

【0101】 ここで、 h_{ar1} が正であることは、第1の反射抑制部42が、回折格子部43の媒質43aと同じ媒質によって構成されていることを示す。また、 h_{ar1} が負であることは、第1の反射抑制部42が、ベース板41の媒質と同じ媒質によって構成されていることを示す。図17は、実施例5の回折格子素子40Aの説明図であり、図18は、実施例6の回折格子素子40Bの説明図である。

図17及び図18は共に、格子に垂直な面で切断した場合の回折格子素子の断面を示している。

【0102】回折格子素子40Aは、 h_{ar1} が正の場合の第4実施形態の回折格子素子40の例である。回折格子素子40Bは、 h_{ar1} が負の場合の第4実施形態の回折格子素子40の例である。回折格子素子40Aは、例えば、ベース板41上的一面に設けられた第2媒質43aをエッチングし、当該エッチングをベース板41に到達する前に停止させた場合に製造される。したがって、第2媒質43aと同一の媒質が第1の反射抑制部42を構成している。

【0103】一方、回折格子素子40Bは、 h_{ar1} が負の場合の第4実施形態の回折格子素子40の例である。回折格子素子40Bは、例えば、ベース板41上的一面に設けられた第2媒質43aをエッチングし、ベース板41の一部が削られるまで当該エッチングを行った場合に製造される。したがって、回折格子素子40Bは、交互に設けられた媒質42aと媒質42bとによって構成されており、媒質42aはベース板41と同一の媒質であり、媒質42bは空気となっている。

【0104】上記最適化の結果を表1、及び図19～図21に示す。

15

表1

	$h_{ar1} (\mu m)$	f	H (μm)	$h_{ar2} (\mu m)$	アスペクト比	最小回折効率(%)	最大回折効率(%)
1	-0.500	0.580	1.119	0.241	4.43	95.4	96.6
2	-0.400	0.587	1.115	0.267	4.31	96.7	97.7
3	-0.300	0.581	1.141	0.256	4.05	97.6	98.6
4	-0.200	0.579	1.164	0.252	3.84	98.0	99.2
5	-0.100	0.649	1.293	0.423	5.17	96.7	97.4
6	0.000	0.656	1.308	0.408	4.99	96.5	97.2
7	0.100	0.576	1.213	0.412	3.84	93.1	93.7
8	0.200	0.644	1.256	0.288	4.34	90.3	91.5
9	0.300	0.590	1.238	0.316	3.79	94.9	95.6

【0105】図19は、第4実施形態に係る回折格子素子の回折効率を示すグラフである。図19は、表1に示す最小回折効率及び最大回折効率をそれぞれプロットしたものである。ここで、最大回折効率、最小回折効率とは、TE偏波光およびTM偏波光を含めて、Cバンド帯で最大の回折効率と最小の回折効率を示している。表1及び図19によれば、回折格子素子40は、90%以上の回折効

率を有し、偏波依存性が小さいことがわかる。なお、第1～第3の実施形態では、第2媒質及び第3媒質からなる回折格子部の上下にAR層、すなわち、回折格子部の外側の媒質と回折格子部との屈折率の差を吸収する層が設けられることによって、反射戻り光が抑制されている。これに対して、回折格子素子40の反射抑制部は第1～第3の実施形態におけるAR層とは異なる条件の平均屈折率を有している。しかしながら、第1の反射抑制部42、回折格子部43、第2の反射抑制部44の多層膜によってベース板41と第1媒質45間のAR層が構成されることによって、回折格子素子40全体としての反射が抑制されている。

【0106】 図20は、第4実施形態に係る回折格子素子における回折格子部のアスペクト比を示すグラフである。図20によれば、 h_{ar1} が-0.2μmまたは0.1μmの場合に、特にアスペクト比が小さいので、回折格子部43の製造が容易であることがわかる

【0107】 図21は、第4実施形態に係る回折格子素子の溝深さトレランスを示すグラフである。ここで、溝深さトレランスとは、回折効率の変化を1%許容した場合にの h_{ar1} の変化の許容値、すなわち、溝深さ誤差を示している。図21によれば、 h_{ar1} が約-0.2μmの場合に溝深さ誤差の許容値が大きく、回折格子素子40の製造が容易であることがわかる。

【0108】 (変形例)

【0109】 本発明は、上記実施形態に限定されるものではなく、種々の変形が可能である。例えば、回折格子部を形成する第2媒質および第3媒質の各領域の断面形状は、上記の各実施形態では長方形であるとしたが、必ずしも長方形である必要はなく、例えば台形であってもよい。デューティ比 f_1 、 f_5 および f_6 は、上記の各実施例では等しいとしたが、互いに異なっていてもよく、後者のようにすることにより回折特性が更に向上し得る。また、各実施形態の回折格子素子において、第1媒質の側から光が入射してもよいし、第4媒質の側から光が入射してもよい。

【0110】 また、上記実施形態においては、第2媒質と第3媒質が互いに接し、かつ、交互に設けられることによって、回折格子部が形成されているが、第2媒質と第3媒質との間に異なる媒質が設けられていても良い。かかる様を、第3実施形態の実施例に係る回折格子素子30Aの変形態様を例として説明する。

5 図22は、変形態様に係る回折格子素子の説明図である。図22は、格子に垂直な面で切断したときの回折格子素子の断面を示している。図22に示す回折格子素子30Bは、回折格子素子30Aと同様の構成を有し、第2媒質32と第3媒質33との間に、媒質36が設けられている。例えば、媒質35aがSiO₂によって構成されており、エッチング時の媒質35aの側面の削れを補うために、第2媒質32のエッチング時にSiO₂を付着させるプロセスを導入した場合には、媒質36がSiO₂によって構成される回折格子素子30Bが製造される。また、第2媒質32がTa₂O₅によって構成されており、エッチング時の第2媒質32の側面の削れを補うために、第2媒質32のエッチング時にTa₂O₅を付着させるプロセスを導入した場合には、媒質36がTa₂O₅によって構成される回折格子素子30Bが製造される。

10 15 【0111】 各実施例は、波長帯域1.5μm～1.6μmで設計を行なったものであるが、これに限定されるものではない。回折格子の設計では、相似則が成立するので、例えば中心波長を1.55μmから1.3μmに変更する場合、長さの単位を持つ設計パラメータ（周期や厚み）を全て1.3／1.55倍にすればよい。このようにして、光通信で用いられる波長帯域1.26μm～1.675μm内の何れかの波長を中心波長とした回折格子を容易に設計することができる。

請求の範囲

1. 互いに平行な第1平面および第2平面を仮想したときに、前記第1平面より外側に前記第1平面に接して設けられた第1媒質（屈折率 n_1 ）と、

前記第1平面と前記第2平面との間に、前記第1平面および前記第2平面に接して、前記第1平面に平行な所定方向に交互に設けられて回折格子を形成している第2媒質（屈折率 n_2 ）および第3媒質（屈折率 n_3 、ただし、 $n_3 < n_2$ ）と、

前記第2平面より外側に前記第2平面に接して設けられた第4媒質（屈折率 n_4 ）と、

を備え、

前記第1媒質、前記第2媒質、前記第3媒質および前記第4媒質それぞれの屈折率 $n_1 \sim n_4$ が「 $n_3 < n_1 < n_2$ 、 $n_3 \leq n_4 \leq n_2$ 」または「 $n_3 \leq n_1 \leq n_2$ 、 $n_3 < n_4 < n_2$ 」なる関係式を満たし、

前記第2媒質および前記第3媒質の双方が固体である、回折格子素子。

2. 前記第1平面と前記第2平面との間における平均屈折率を n_{av} としたときに、前記第1媒質の屈折率 n_1 が「 $n_{av} - 0.2 \leq n_1 \leq n_{av} + 0.2$ 」なる関係式を満たす、請求項1に記載の回折格子素子。

3. 前記第4媒質の屈折率 n_4 が「 $n_{av} - 0.2 \leq n_4 \leq n_{av} + 0.2$ 」なる関係式を満たす、請求項2に記載の回折格子素子。

4. 前記第1平面に垂直な方向についての前記第1媒質の厚みが $5\mu m$ 以上である、請求項1に記載の回折格子素子。

5. 前記第1平面に垂直な方向についての前記第4媒質の厚みが $5\mu m$ 以上である、請求項4に記載の回折格子素子。

6. TE偏波光およびTM偏波光それぞれの回折効率が90%以上となる光の波長が存在する、請求項1に記載の回折格子素子。

7. TE偏波光およびTM偏波光それぞれの回折効率の差が5%以下となる光の波長が存在する、請求項1に記載の回折格子素子。

8. 前記第2媒質の屈折率 n_2 と前記第3媒質の屈折率 n_3 との差が0.7以上である、請求項1に記載の回折格子素子。

9. 前記第2媒質または前記第3媒質がエネルギー線照射により屈折率が変化し得る所定材料からなる、請求項1に記載の回折格子素子。

5 10. 前記所定材料がダイヤモンド様炭素である、請求項9に記載の回折格子素子。

11. 前記第1媒質または前記第4媒質が、前記第2媒質または前記第3媒質よりエッチングレートが遅い所定材料からなる、請求項1に記載の回折格子素子。

10 12. 前記所定材料が Al_2O_3 , MgO , Nd_2O_3 およびフッ素系化合物の何れかである、請求項11に記載の回折格子素子。

13. 前記第2媒質または前記第3媒質が TiO_2 , Nb_2O_5 , Ta_2O_5 , SiN , SiO_2 , SiO , ZrO_2 , Sb_2O_3 の何れかである、請求項11に記載の回折格子素子。

15 14. 前記第2の媒質と前記第3の媒質とは互いに接している、請求項1に記載の回折格子素子。

15. 互いに平行な第1平面および第2平面を仮想したときに、前記第1平面より外側に前記第1平面に接して設けられた第1媒質(屈折率 n_1)と、

20 前記第1平面と前記第2平面との間に、前記第1平面および前記第2平面に接して、前記第1平面に平行な所定方向に交互に設けられて回折格子を形成している第2媒質(屈折率 n_2)および第3媒質(屈折率 n_3 、ただし、 $n_3 < n_2$)と、

前記第2平面より外側に前記第2平面に接して設けられた第4媒質(屈折率 n_4)と、

を備え、

25 前記第1媒質、前記第2媒質、前記第3媒質および前記第4媒質それぞれの屈折率 $n_1 \sim n_4$ が「 $n_3 < n_1 < n_2$ 、 $n_3 \leq n_4 \leq n_2$ 」または「 $n_3 \leq n_1 \leq n_2$ 、 $n_3 < n_4$

< n_2 」なる関係式を満たし、

前記第1媒質または前記第4媒質が等方性材料からなる、回折格子素子。

16. 前記第1平面と前記第2平面との間における平均屈折率を n_{av} としたときに、前記第1媒質の屈折率 n_1 が「 $n_{av} - 0.2 \leq n_1 \leq n_{av} + 0.2$ 」なる関係式を満たす、請求項15に記載の回折格子素子。

17. 前記第4媒質の屈折率 n_4 が「 $n_{av} - 0.2 \leq n_4 \leq n_{av} + 0.2$ 」なる関係式を満たす、請求項16に記載の回折格子素子。

18. 前記第1平面に垂直な方向についての前記第1媒質の厚みが 5 μm 以上である、請求項15に記載の回折格子素子。

19. 前記第1平面に垂直な方向についての前記第4媒質の厚みが 5 μm 以上である、請求項18に記載の回折格子素子。

20. TE偏波光およびTM偏波光それぞれの回折効率が 90 % 以上となる光の波長が存在する、請求項15に記載の回折格子素子。

21. TE偏波光およびTM偏波光それぞれの回折効率の差が 5 % 以下となる光の波長が存在する、請求項15に記載の回折格子素子。

22. 前記第2媒質の屈折率 n_2 と前記第3媒質の屈折率 n_3 との差が 0.7 以上である、請求項15に記載の回折格子素子。

23. 前記第2媒質が TiO_2 , Ta_2O_5 および Nb_2O_5 の何れかであり、前記第3媒質が気体である、請求項22に記載の回折格子素子。

24. 前記第2媒質または前記第3媒質がエネルギー線照射により屈折率が変化し得る所定材料からなる、請求項15に記載の回折格子素子。

25. 前記所定材料がダイヤモンド様炭素である、請求項24に記載の回折格子素子。

26. 前記第1媒質または前記第4媒質が、前記第2媒質または前記第3媒質よりエッチングレートが遅い所定材料からなる、請求項15に記載の回折格子素子。

27. 前記所定材料が Al_2O_3 , MgO , Nd_2O_3 およびフッ素系化合物の何れかである、請求項 26 に記載の回折格子素子。

28. 前記第 2 媒質または前記第 3 媒質が TiO_2 , Nb_2O_5 , Ta_2O_5 , SiN , SiO_2 , SiO , ZrO_2 , Sb_2O_3 の何れかである、請求項 26 に記載の回折格子素子。
5

29. 前記第 2 の媒質と前記第 3 の媒質とは互いに接している、請求項 15 に記載の回折格子素子。

30. 互いに平行に順に並んだ第 1 ~ 第 4 平面を仮想したときに、前記第 1 平面より外側に前記第 1 平面に接して設けられた第 1 媒質（屈折率 n_1 ）と、
10

前記第 2 平面と前記第 3 平面との間に、前記第 2 平面および前記第 3 平面に接して、前記第 1 平面に平行な所定方向に交互に設けられて回折格子を形成している第 2 媒質（屈折率 n_2 ）および第 3 媒質（屈折率 n_3 、ただし、 $n_3 < n_2$ ）と、
15

前記第 4 平面より外側に前記第 4 平面に接して設けられた第 4 媒質（屈折率 n_4 ）と、
15

前記第 1 平面と前記第 2 平面との間に、前記第 1 平面および前記第 2 平面に接して設けられた第 5 媒質（平均屈折率 n_5 ）と、
20

前記第 3 平面と前記第 4 平面との間に、前記第 3 平面および前記第 4 平面に接して設けられた第 6 媒質（平均屈折率 n_6 ）と、
20
を備え、

前記第 2 平面と前記第 3 平面との間における平均屈折率を n_{av} としたときに、前記第 5 媒質の平均屈折率 n_5 が「 $n_1 < n_5 < n_{av}$ 」または「 $n_{av} < n_5 < n_1$ 」なる関係式を満たし、前記第 6 媒質の平均屈折率 n_6 が「 $n_4 < n_6 < n_{av}$ 」または「 $n_{av} < n_6 < n_4$ 」なる関係式を満たす、回折格子素子。
25

31. 前記第 5 媒質の平均屈折率 n_5 が「 $(n_1 n_{av})^{1/2} - 0.2 < n_5 < (n_1 n_{av})^{1/2} + 0.2$ 」なる関係式を満たす、請求項 30 に記載の回折格子素子。
25

32. 前記第 6 媒質の平均屈折率 n_6 が「 $(n_4 n_{av})^{1/2} - 0.2 < n_6 < (n_4 n_{av})^{1/2}$

+ 0.2」なる関係式を満たす、請求項 3 1 に記載の回折格子素子。

3 3. 前記回折格子の周期を Λ とし、前記第 1 平面に垂直な方向についての前記第 5 媒質の厚みを h_5 とし、波長 λ の光が前記回折格子に入射するとしたときに、「 $\lambda\Lambda/4(4n_5^2\Lambda^2-\lambda^2)^{1/2} < h_5 < 3\lambda\Lambda/4(4n_5^2\Lambda^2-\lambda^2)^{1/2}$ 」なる関係式を満たす光の波長 λ が波長帯域 $1.26 \mu\text{m} \sim 1.675 \mu\text{m}$ 内に存在する、請求項 3 0 に記載の回折格子素子。

3 4. 前記回折格子の周期を Λ とし、前記第 1 平面に垂直な方向についての前記第 6 媒質の厚みを h_6 とし、波長 λ の光が前記回折格子に入射するとしたときに、「 $\lambda\Lambda/4(4n_6^2\Lambda^2-\lambda^2)^{1/2} < h_6 < 3\lambda\Lambda/4(4n_6^2\Lambda^2-\lambda^2)^{1/2}$ 」なる関係式を満たす光の波長 λ が波長帯域 $1.26 \mu\text{m} \sim 1.675 \mu\text{m}$ 内に存在する、請求項 3 3 に記載の回折格子素子。

3 5. 前記第 5 媒質が前記所定方向に交互に設けられた複数の媒質からなる、請求項 3 0 に記載の回折格子素子。

3 6. 前記第 6 媒質が前記所定方向に交互に設けられた複数の媒質からなる、請求項 3 5 に記載の回折格子素子。

3 7. T E 偏波光及び TM 偏波光それぞれの回折効率が 90% 以上となる光の波長が存在する、請求項 3 0 に記載の回折格子素子。

3 8. T E 偏波光および TM 偏波光それぞれの回折効率の差が 5% 以下となる光の波長が存在する、請求項 3 0 に記載の回折格子素子。

3 9. 前記第 2 媒質の屈折率 n_2 と前記第 3 媒質の屈折率 n_3 との差が 0.7 以上である、請求項 3 0 に記載の回折格子素子。

4 0. 前記第 2 媒質が TiO_2 , Ta_2O_5 および Nb_2O_5 の何れかであり、前記第 3 媒質が気体である、請求項 3 9 に記載の回折格子素子。

4 1. 前記第 2 媒質または前記第 3 媒質がエネルギー線照射により屈折率が変化し得る所定材料からなる、請求項 3 0 に記載の回折格子素子。

4 2. 前記所定材料がダイヤモンド様炭素である、請求項 4 1 に記載の回折

格子素子。

4 3. 前記第1媒質、前記第4媒質、前記第5媒質、又は前記第6媒質が、前記第2媒質または前記第3媒質よりエッチングレートが遅い所定材料からなる、請求項30に記載の回折格子素子。

5 4 4. 前記所定材料が Al_2O_3 , MgO , Nd_2O_3 およびフッ素系化合物の何れかである、請求項43に記載の回折格子素子。

4 5. 前記第2媒質または前記第3媒質が TiO_2 , Nb_2O_5 , Ta_2O_5 , SiN , SiO_2 , SiO , ZrO_2 , Sb_2O_3 の何れかである、請求項43に記載の回折格子素子。

10 4 6. 前記第2の媒質と前記第3の媒質とは互いに接している、請求項30に記載の回折格子素子。

4 7. 互いに平行に順に並んだ第1～第3平面を仮想したときに、前記第1平面より外側に前記第1平面に接して設けられた第1媒質（屈折率 n_1 ）と、

15 前記第2平面と前記第3平面との間に、前記第2平面および前記第3平面に接して、前記第1平面に平行な所定方向に交互に設けられて回折格子を形成している第2媒質（屈折率 n_2 ）および第3媒質（屈折率 n_3 、ただし、 $n_3 < n_2$ ）と、

前記第3平面より外側に前記第3平面に接して設けられた第4媒質（屈折率 n_4 ）と、

20 前記第1平面と前記第2平面との間に、前記第1平面および前記第2平面に接して設けられた第5媒質（平均屈折率 n_5 ）と、

を備え、

前記第1平面と前記第2平面との間における平均屈折率を n_{av} としたときに、前記第5媒質の平均屈折率 n_5 が「 $n_1 < n_5 < n_{av}$ 」または「 $n_{av} < n_5 < n_1$ 」なる関係式を満たす、回折格子素子。

25 4 8. 前記第5媒質の平均屈折率 n_5 が「 $(n_1 n_{av})^{1/2} - 0.2 < n_5 < (n_1 n_{av})^{1/2} + 0.2$ 」なる関係式を満たす、請求項47に記載の回折格子素子。

4 9. 前記回折格子の周期を Λ とし、前記第1平面に垂直な方向についての前記第5媒質の厚みを h_5 とし、波長 λ の光が前記回折格子に入射するとしたときに、「 $\lambda\Lambda/4(4n_5^2\Lambda^2-\lambda^2)^{1/2} < h_5 < 3\lambda\Lambda/4(4n_5^2\Lambda^2-\lambda^2)^{1/2}$ 」なる関係式を満たす光の波長 λ が波長帯域 $1.26\mu\text{m} \sim 1.675\mu\text{m}$ 内に存在する、請求項4 7 に記載の回折格子素子。

5 0. 前記第5媒質が前記所定方向に交互に設けられた複数の媒質からなる、請求項4 7 に記載の回折格子素子。

5 1. 前記第2媒質、前記第3媒質および前記第4媒質それぞれの屈折率 $n_2 \sim n_4$ が「 $n_3 < n_4 < n_2$ 」なる関係式を満たす、請求項4 7 に記載の回折格子素子。

5 2. 前記第4媒質の屈折率 n_4 が「 $n_{uv}-0.2 \leq n_4 \leq n_{uv}+0.2$ 」なる関係式を満たす、請求項5 1 に記載の回折格子素子。

5 3. 前記第1平面に垂直な方向についての前記第4媒質の厚みが $5\mu\text{m}$ 以上である、請求項5 1 に記載の回折格子素子。

5 4. TE偏波光およびTM偏波光それぞれの回折効率が90%以上となる光の波長が存在する、請求項4 7 に記載の回折格子素子。

5 5. TE偏波光およびTM偏波光それぞれの回折効率の差が5%以下となる光の波長が存在する、請求項4 7 に記載の回折格子素子。

5 6. 前記第2媒質の屈折率 n_2 と前記第3媒質の屈折率 n_3 との差が0.7以上である、請求項4 7 に記載の回折格子素子。

5 7. 前記第2媒質が TiO_2 、 Ta_2O_5 および Nb_2O_5 の何れかであり、前記第3媒質が気体である、請求項5 6 に記載の回折格子素子。

5 8. 前記第2媒質または前記第3媒質がエネルギー線照射により屈折率が変化し得る所定材料からなる、請求項4 7 に記載の回折格子素子。

5 9. 前記所定材料がダイヤモンド様炭素である、請求項5 8 に記載の回折格子素子。

6 0. 前記第1媒質、前記第4媒質、又は前記第5媒質が、前記第2媒質ま

たは前記第3媒質よりエッチングレートが遅い所定材料からなる、請求項47に記載の回折格子素子。

61. 前記所定材料が Al_2O_3 , MgO , Nd_2O_3 およびフッ素系化合物の何れかである、請求項60に記載の回折格子素子。

5 62. 前記第2媒質または前記第3媒質が TiO_2 , Nb_2O_5 , Ta_2O_5 , Si , SiO_2 , SiO , ZrO_2 , Sb_2O_3 の何れかである、請求項60に記載の回折格子素子。

63. 前記第2の媒質と前記第3の媒質とは互いに接している、請求項47に記載の回折格子素子。

10 64. ベース板と、

前記ベース板上に設けられた第1の反射抑制部と、

前記第1の反射抑制部上に設けられた回折格子部と、

前記回折格子部上に設けられた第2の反射抑制部と

を備え、

前記第2の反射抑制部は第1の媒質に接しており、

前記回折格子部には、前記ベース板に平行な所定方向に第2媒質及び第3媒質が交互に設けられることによって回折格子が設けられており、

1. $2.6 \mu\text{m} \sim 1.675 \mu\text{m}$ の波長帯域において反射率が 10% 以下となる波長が存在する、回折格子素子。

20 65. 前記ベース板、前記第1の反射抑制部、前記回折格子部、及び前記第2の反射抑制部が順に並んでいる方向を z 方向、前記所定方向を x 方向とし、

屈折率分布を $n(x, z)$ 、前記回折格子の周期を Λ とし、

平均屈折率 $n_{av}(z)$ を

$$n_{av}(z) = \sqrt{\frac{\int_0^\Lambda n^2(x, z) dx}{\Lambda}}$$

25 屈折率変調 $\Delta n(z)$ を

$$\Delta n(z) = \sqrt{\frac{\Lambda \int_0^z \{n^2(x, z) - n_{av}^2(z)\}^2 dx}{\int_0^z n(x, z) dx}}$$

z 方向における位置 z 1 から位置 z 2 までの回折能力 P (z 1 , z 2) を

$$P(z1, z2) = \int_{z1}^{z2} \Delta n(z) dz$$

とした場合に、

5 前記回折格子部の回折能力は、前記回折格子部、前記第 1 の反射抑制部、及び前記第 2 の反射抑制部の全体の回折能力の 50 % より大きい、請求項 6 4 に記載の回折格子素子。

6 6 . 前記回折格子部の屈折率変調は、前記第 1 の反射抑制部及び前記第 2 の反射抑制部の屈折率変調より大きい、請求項 6 5 に記載の回折格子素子。

10 6 7 . 前記回折格子部の最大屈折率が、前記ベース板及び前記第 1 媒質の屈折率より大きい、請求項 6 4 に記載の回折格子素子。

6 8 . 前記回折格子の周期は、1. 675 μm 以下である、請求項 6 4 に記載の回折格子素子。

15 6 9 . TE 偏波光および TM 偏波光それぞれの回折効率が 90 % 以上となる光の波長が存在する、請求項 6 4 に記載の回折格子素子。

7 0 . TE 偏波光および TM 偏波光それぞれの回折効率の差が 5 % 以下となる光の波長が存在する、請求項 6 4 に記載の回折格子素子。

7 1 . 前記第 2 媒質の屈折率 n₂ と前記第 3 媒質の屈折率 n₃ との差が 0.7 以上である、請求項 6 4 に記載の回折格子素子。

20 7 2 . 前記第 2 媒質が TiO₂ , Ta₂O₅ および Nb₂O₅ の何れかであり、前記第 3 媒質が気体である、請求項 7 1 に記載の回折格子素子。

7 3 . 前記第 2 媒質または前記第 3 媒質がエネルギー線照射により屈折率が変化し得る所定材料からなる、請求項 6 4 に記載の回折格子素子。

74. 前記所定材料がダイヤモンド様炭素である、請求項73に記載の回折格子素子。

75. 前記第2の媒質と前記第3の媒質とは互いに接している、請求項64に記載の回折格子素子。

5 76. 請求項1, 15, 30, 47, 及び64の何れか1項に記載の回折格子素子を製造する方法であって、

エネルギー線照射により屈折率が変化し得る所定材料からなる層を形成し、その層に対してエネルギー線を所定の空間的強度変調パターンで照射して、その層において互いに屈折率が異なる前記第2媒質および前記第3媒質が交互に設けられた回折格子を形成する、回折格子素子製造方法。

10 77. 請求項1, 15, 30, 47, 及び64の何れか1項に記載の回折格子素子を製造する方法であって、

所定材料からなる層を形成し、その層に対して所定の空間的パターンでエッチングして、その層において互いに屈折率が異なる前記第2媒質および前記第3媒質が交互に設けられた回折格子を形成する、回折格子素子製造方法。

15 78. 所定方向に周期的に屈折率が変化する回折格子部と、該回折格子部の上下の少なくとも一方に反射抑制部を有する回折格子素子の設計方法であって、

前記回折格子部及び反射抑制部それぞれを、各々に含まれる媒質による平均屈折率を有する膜とし、かつ、前記回折格子部における光の位相変化を90度に設定し、

20 所望の波長において反射率が1.0%以下となるように該回折格子素子の屈折率分布を導出する、回折格子素子の設計方法。

開示内容の要約

回折格子素子10では、第1媒質11と第4媒質14との間において、第2媒質12と第3媒質13とが交互に設けられて回折格子が形成されている。第1媒質11から回折格子へ入射した光は、回折格子部において回折され、第4媒質14へ出射される。或いは、第4媒質14から回折格子へ入射した光は、回折格子部において回折され、第1媒質11へ出射される。各媒質の屈折率 $n_1 \sim n_4$ は「 $n_3 < n_1 < n_2$ 、 $n_3 \leq n_4 \leq n_2$ 」または「 $n_3 \leq n_1 \leq n_2$ 、 $n_3 < n_4 < n_2$ 」なる関係式を満たす。